ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά μαθήματα ΠΠ

Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού

Ενότητα 10: Υδροστρόβιλοι

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Φυσικής

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Σκοποί ενότητας

- Κατηγοριοποίηση στροβίλων
- Τρίγωνα ταχυτήτων
- Εξίσωση Euler
- Απόδοση στροβίλου Pelton
- Απόδοση στροβίλου Francis

Περιεχόμενα ενότητας

- Κατηγοριοποίηση στροβίλων
- Τρίγωνα ταχυτήτων
- Εξίσωση Euler
- Απόδοση στροβίλου Pelton
- Απόδοση στροβίλου Francis

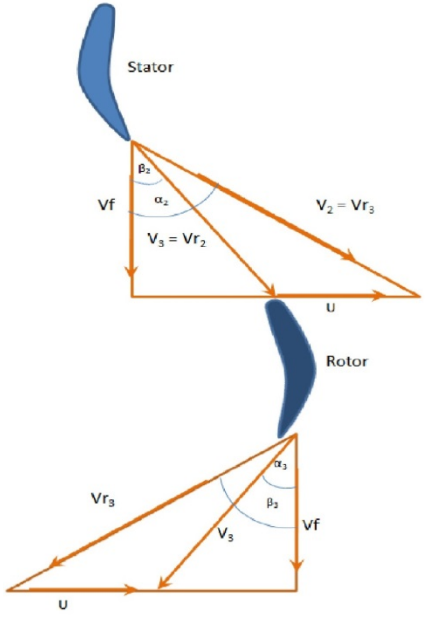
Είδη στροβίλων

Δράσης (Impulse): Pelton – Turgo

Αντίδρασης (Reaction): Francis – kaplan

<u>Περιγραφή λειτουργίας υδροστροβίλων με Τρίγωνα ταχυτήτων</u>

Θεωρούμε σταθερές συνθήκες (δηλαδή δεν έχουμε μεταβολή παροχής, περιστροφικής ταχύτητας με το χρόνο).



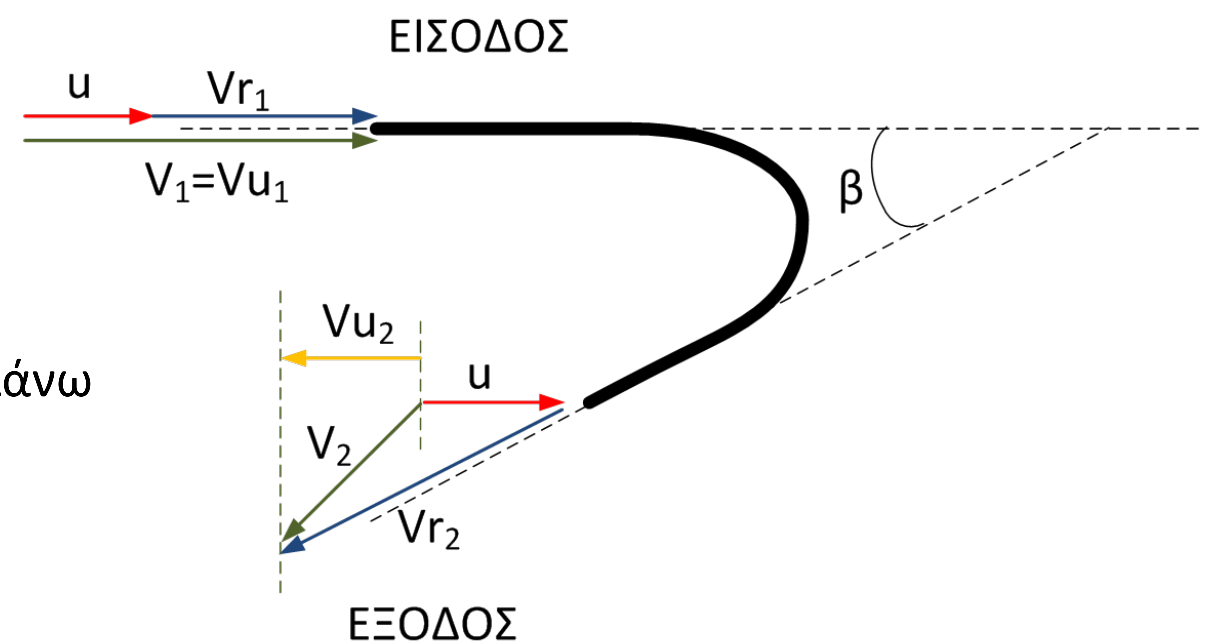
http://en.wikipedia.org/wiki/Degree_of_reaction

Τρίγωνα ταχυτήτων (1)

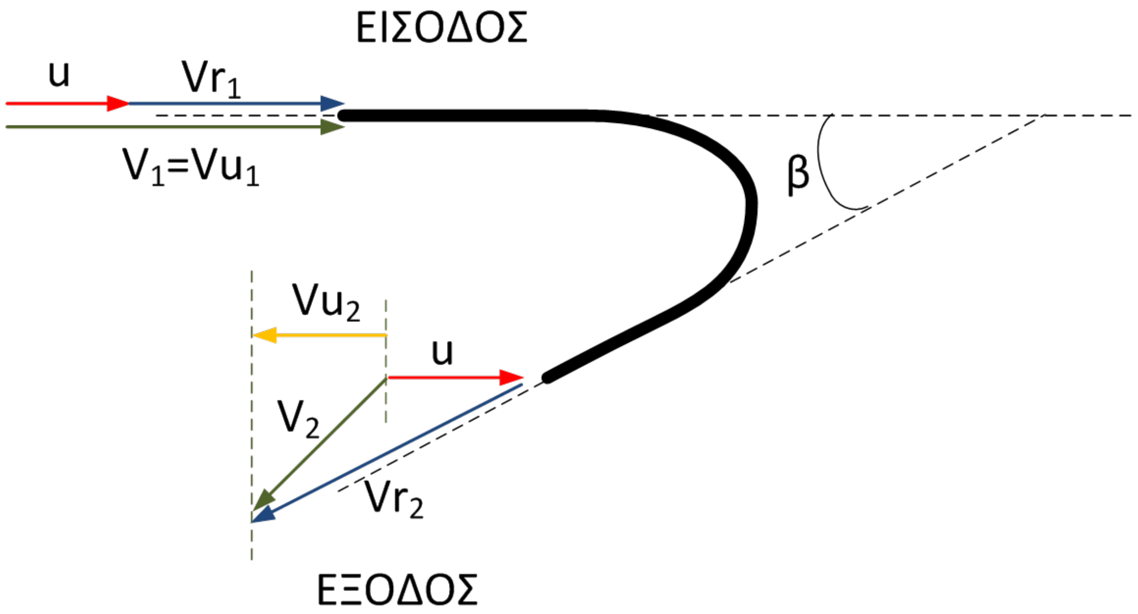
1)**u**: εφαπτομενική ταχύτητα στροβίλου
2)**V**:ταχύτητα του H_2O σε ακίνητο σύστημα αναφοράς (σύστημα αναφοράς εργοστασίου)
3)**Vu**: εφαπτομενική συνιστώσα της V
4)**Vr**: σχετική ταχύτητα στο σύστημα αναφοράς περιστρεφόμενου στροβίλου $\vec{V}r = \vec{V} - \vec{u}$

Είσοδος στροβίλου:

Vu1: προβολής της V1 πάνω στην ευθεία (ε)



Τρίγωνα ταχυτήτων(2)



Έξοδος στροβίλου

$$Vu_1 = V_1 \cos a$$

$$Vr_1^2 = V_1^2 + u_1^2 - 2u_1 V_1 \cos a \xrightarrow{Vu_1 = V_1 \cos a} Vr_1^2 = V_1^2 + u_1^2 - 2u_1 Vu_1 \Rightarrow Vu_1 \cdot u_1 = \frac{V_1^2 + u_1^2 - Vr_1^2}{2}$$

Τρίγωνα ταχυτήτων (3)

Ορμή ανά μονάδα χρόνου:

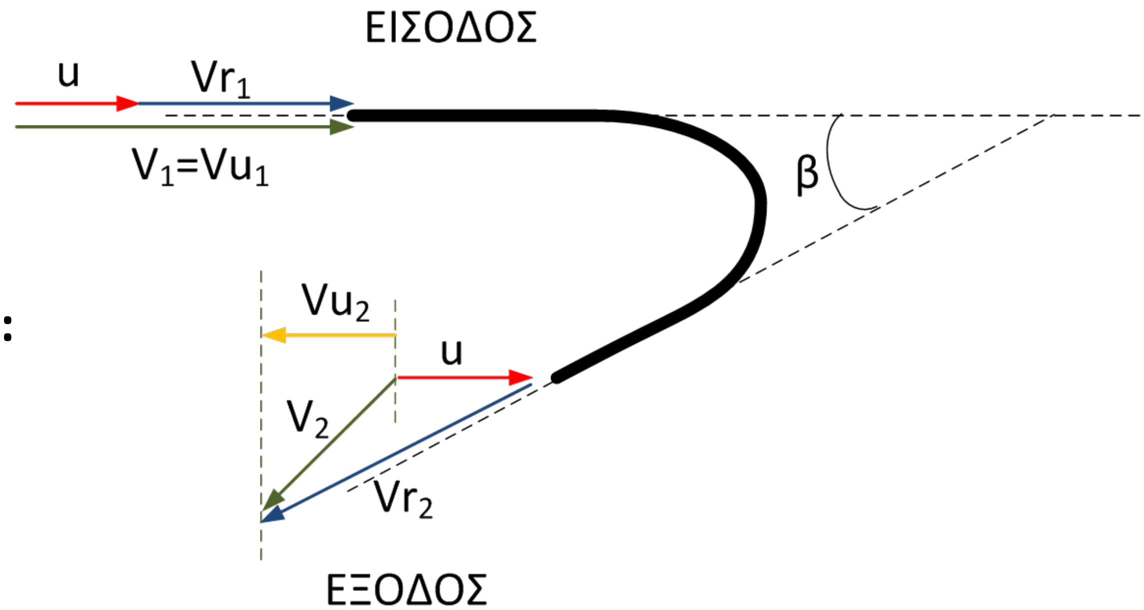
$$\dot{m}Vu = \rho QVu$$

Στροφορμή ανά μονάδα χρόνου:

$$\rho QVur$$

$$\xrightarrow{\varepsilon\acute{\iota}\sigma o\delta o} \rho QVu_1 r_1$$

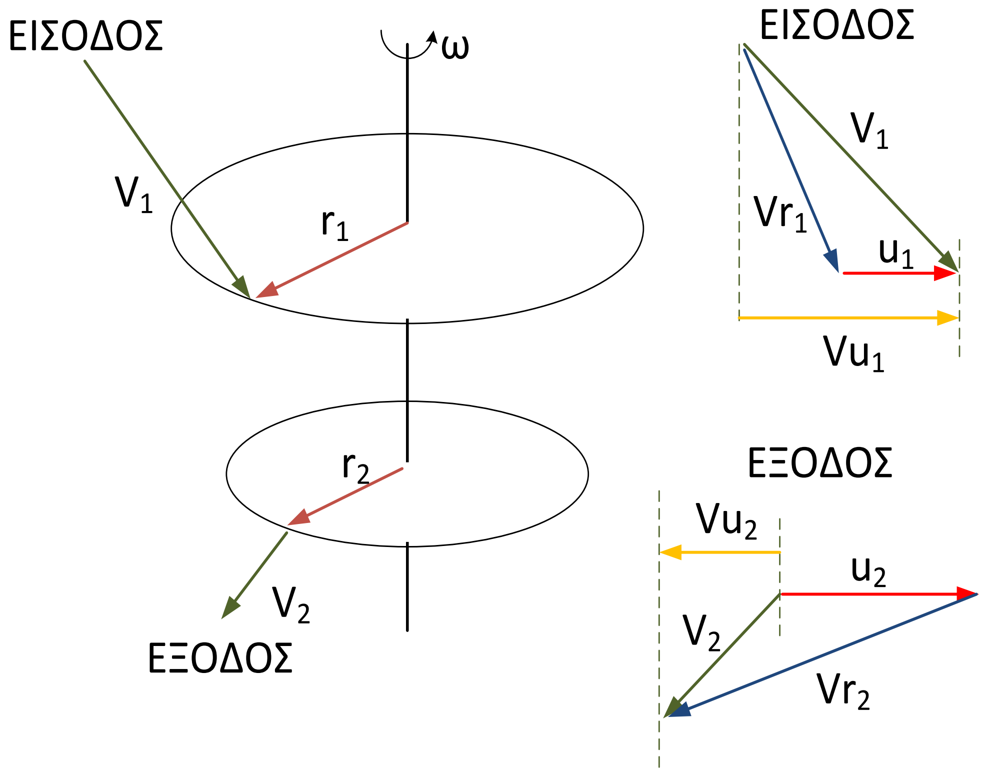
$$\xrightarrow{\acute{\varepsilon}\xi o\delta o} \rho QVu_2 r_2$$



Ροπή που ασκείται στο στρόβιλο: $\mathrm{M} = \rho Q\left(Vu_1 r_1 \pm Vu_2 r_2\right)$

Ροπή που ασκείται στο ρευστό: $\mathrm{M} = \rho Q\left(Vu_2 r_2 \pm Vu_1 r_1\right)$

Εξίσωση Euler (1)

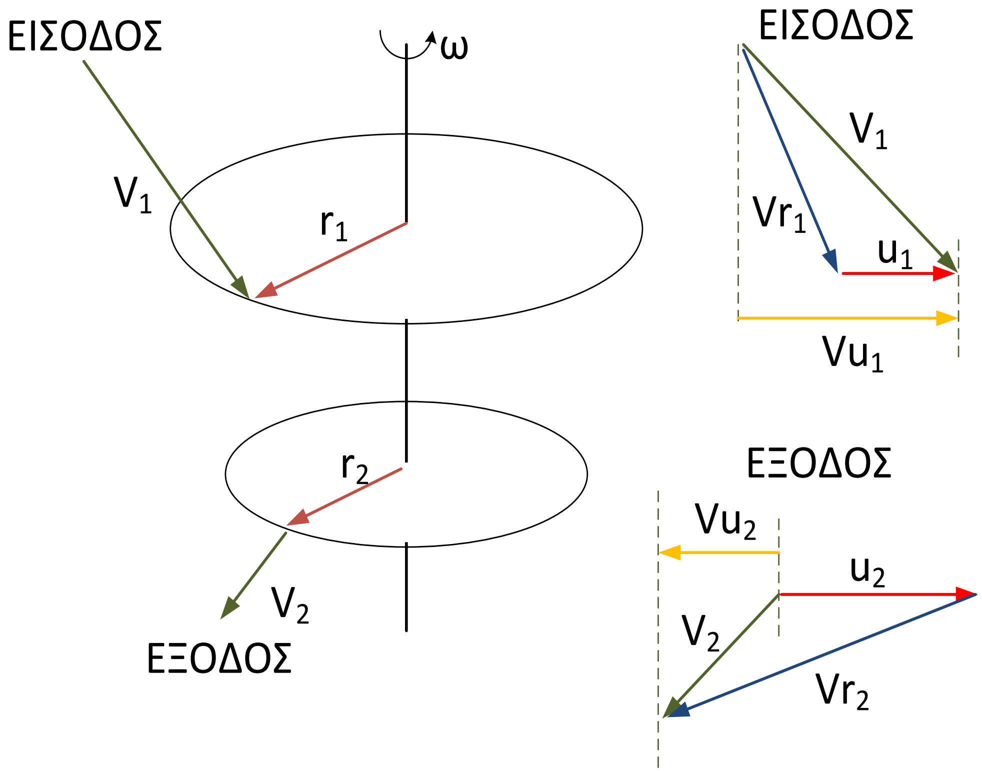


$$P = \mathrm{M}\omega = \rho Q\left(Vu_1 r_1 \omega \pm Vu_2 r_2 \omega\right) \Rightarrow$$

$$P = \rho Q\left(Vu_1 u_1 \pm Vu_2 u_2\right) \Rightarrow \text{Εξίσωση Euler}$$

$$P = \rho Q\left[\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}\,\frac{Vr_2^2 - Vr_1^2}{2}\right]$$

Εξίσωση Euler (2)



Δυναμική Συνιστώσα: Συνολική μεταβολή της ταχύτητας στην είσοδο σε σχέση με την έξοδο (PELTON, TURGO)

$$\boxed{\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}}$$

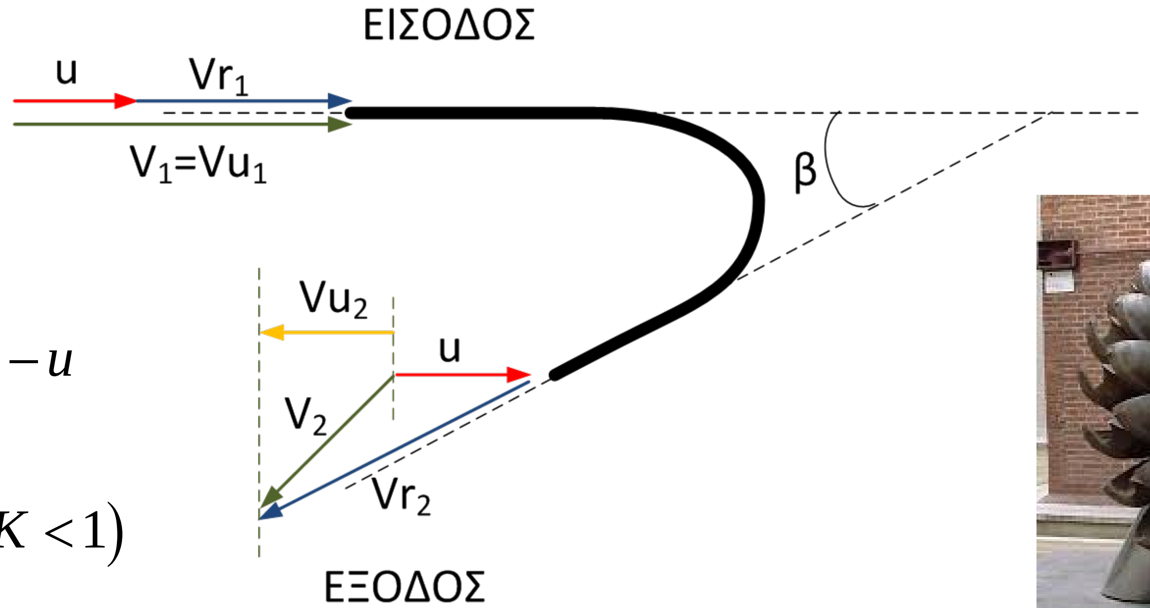
Φυγοκεντρική συνιστώσα: συνεισφορά στην ισχύ από τη μεταβολή της ακτίνας (Francis)

$$\boxed{\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \rightarrow \frac{\omega^2\left(r_1^2 - r_2^2\right)}{2}}$$

Συνιστώσα επιτάχυνσης: Διαφορά τετραγώνων σχετικής ταχύτητας του ρευστού και έξοδο σε σχέση με την είσοδο (Francis, Kaplan).

$$\boxed{\frac{Vr_2^2 - Vr_1^2}{2}}$$

Απόδοση στροβίλου Pelton (1)



Ισχύουν:

$$Vr_1 = V_1 - u_1 = V_1 - u$$

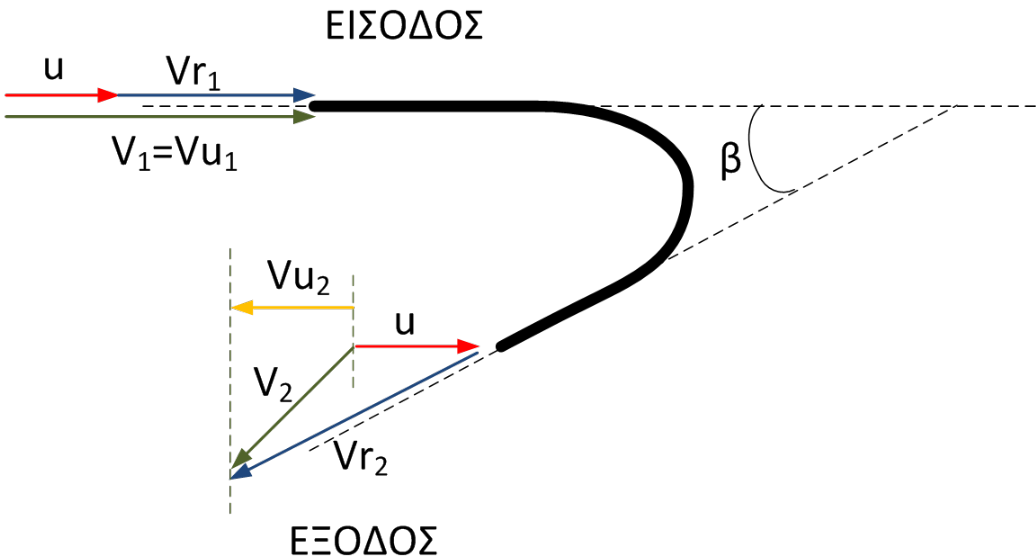
$$u_1 = u_2$$

$$Vr_2 = KVr_1 \left(0 < K < 1\right)$$

Συντελεστής υδραυλικής απόδοσης Στροβίλου:

$$n = \frac{P_{\sigma\tau\rho}}{P_{\delta\iota\alpha\theta\acute{\epsilon}\sigma\iota\mu\eta}} = \frac{\rho Q\left(Vu_1 U_1 - Vu_2 U_2\right)}{\frac{1}{2}\rho Q V_1^2} \Rightarrow n = \frac{\cancel{\rho}\,\cancel{Q}\left(Vu_1 - Vu_2\right)U}{\frac{1}{2}\cancel{\rho}\,\cancel{Q} V_1^2} \Rightarrow \boxed{n = \frac{2\left(Vu_1 - Vu_2\right)U}{V_1^2} (1)}$$

Απόδοση στροβίλου Pelton (2)



<u>Για την Α περίπτωση:</u>

$$\left.\begin{aligned} Vu_2 &= Vr_2 \cos\beta - u \\ Vr_2 &= KVr_1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left.\begin{aligned} Vu_2 &= KVr_1 \cos\beta - u \\ Vr_1 &= V_1 - u \end{aligned}\right\} \Rightarrow Vu_2 = K\left(V_1 - u\right)\cos\beta - u \Rightarrow$$

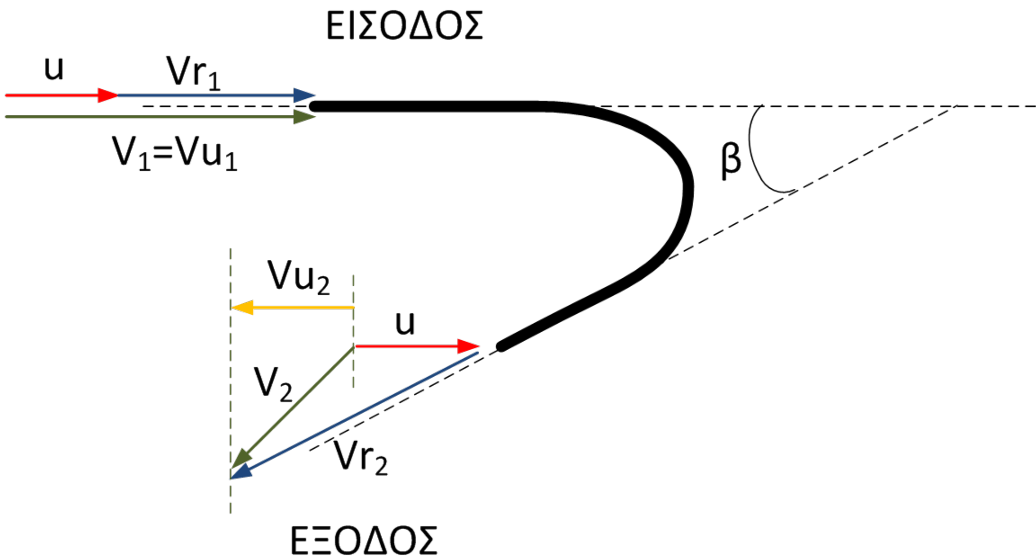
$$Vu_2 = \left(V_1 - u\right)K\cos\beta - u\,(2)$$

$$(1)\xrightarrow{(2)} n = \frac{2\left[V_1 - \left(V_1 - u\right)K\cos\beta + u\right]}{V_1^2} = \frac{2\left[V_1 - VK_1\cos\beta + uK_1\cos\beta + u\right]}{V_1^2} =$$

$$\frac{2\left(V_1 - uK\cos\beta + uK\cos\beta + u\right)}{V_1^2} \Rightarrow n = \frac{2\left(1 + K\cos\beta u\right)\left(V_1 - u\right)u}{V_1^2}$$

Απόδοση στροβίλου Pelton (3)

Το **K** σχετίζεται με το πόσο λεία είναι τα τοιχώματα του στροβίλου



Λόγος ταχυτήτων (speed ratio φ ή λ)

$$\boxed{\lambda = \frac{u}{V_1}}$$

οπότε:

$$(3) \Rightarrow n = 2\left(1 + K\cos\beta\right)\left(\frac{V_1 u}{V_1^2} - \frac{u^2}{V_1^2}\right) \Rightarrow \boxed{n = 2\left(1 + K\cos\beta\right)\left(\lambda - \lambda^2\right)}$$

Μέγιστο της υδραυλικής απόδοσης έχουμε για:

$$\frac{dn}{d\lambda} = 0 \Rightarrow 1 - 2\lambda = 0 \Rightarrow 1 = 2\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{u}{V_1} = \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$\frac{\omega R}{V_1} = \frac{1}{2} \Rightarrow V_1 = 2\omega R \Rightarrow \boxed{\omega = \frac{V_1}{2R}}$$

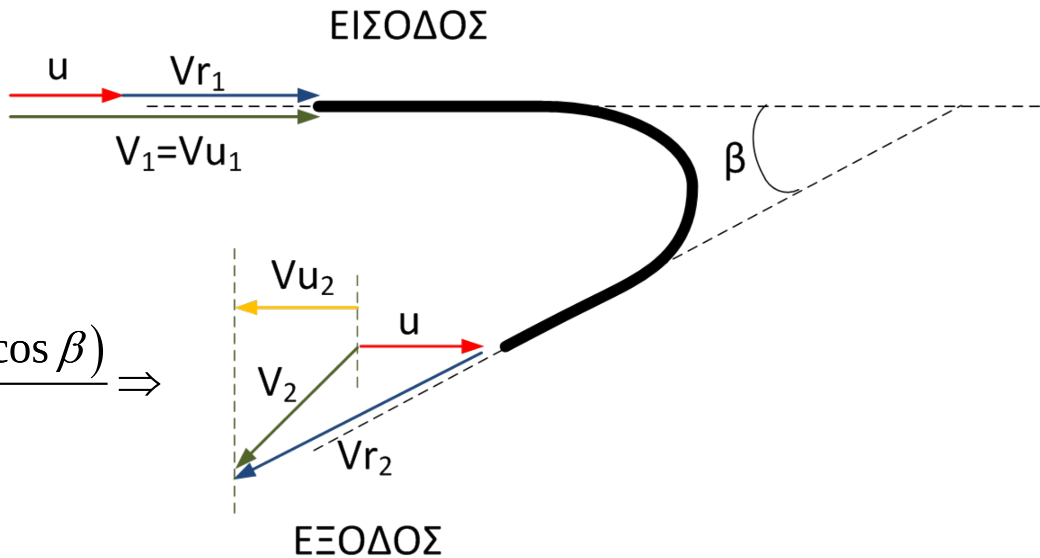
Απόδοση στροβίλου Pelton (4)

$$\frac{d^2 n}{d\lambda^2} = -2 < 0\left(\mu\varepsilon\gamma\iota\sigma\tau o\right)$$

$$O\pi\acute{o}\tau\varepsilon: n_{\max} = 2\left(1 + K\cos\beta\right)\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right) =$$

$$= 2\left(1 + K\cos\beta\right)\left(\frac{2-1}{4}\right) = \frac{2\left(1 + K\cos\beta\right)}{4} \Rightarrow$$

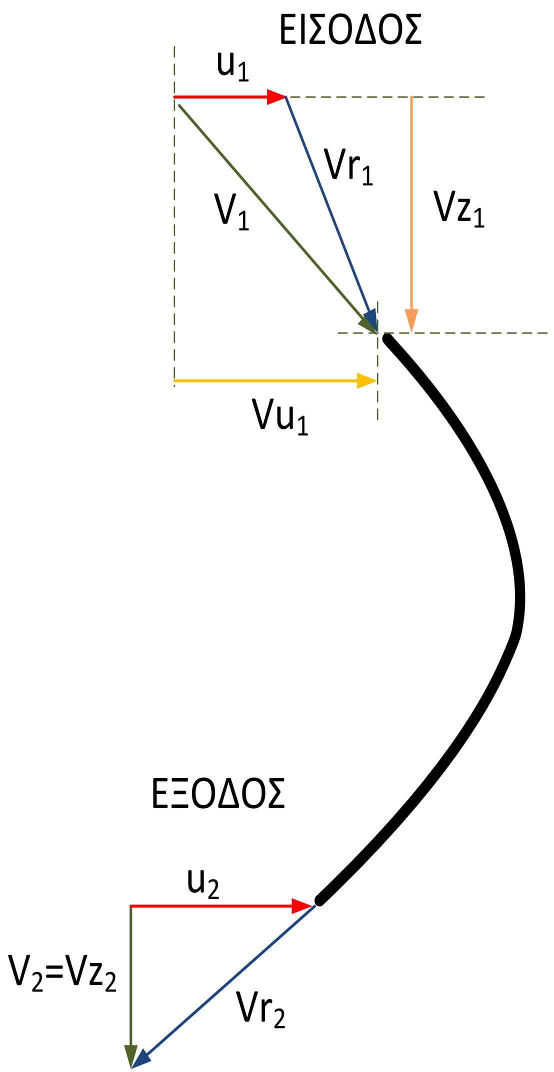
$$\boxed{n_{\max} = \frac{1 + K\cos\beta}{2}}$$



Επαναλαμβάνω για Β περίπτωση

$$n = \frac{P_{\sigma\tau\rho}}{P_{\delta\iota\alpha\theta}} = \frac{\rho Q\left(Vu_1 U_1 - Vu_2 U_2\right)}{\frac{1}{2}\rho Q V_1^2} = \frac{\cancel{\rho}\,\cancel{Q}\left(Vu_1 - Vu_2\right)U}{\frac{1}{2}\cancel{\rho}\,\cancel{Q} V_1^2} = \frac{2\left(Vu_1 - Vu_2\right)U}{V_1^2}$$

Απόδοση στροβίλου Francis (1)



Ο συντελεστής υδραυλικής απόδοσης του στροβίλου είναι:

$$n = \frac{P_{\sigma\tau\rho}}{P_{\delta\iota\alpha\theta}} = \frac{\rho Q\left(Vu_1 U_1 - Vu_2 U_2\right)}{\frac{1}{2}\rho Q V_1^2} = \frac{2\left(Vu_1 - Vu_2\right)U}{V_1^2}$$

Συνθήκη βελτιστοποίησης του n είναι $Vu_2 = 0$ άρα

$$\left.\begin{array}{l} n = \dfrac{2Vu_1 U_1}{V_1^2} \\ V_1^2 = 2gH \end{array}\right\} n = \frac{\cancel{2}Vu_1 U_1}{\cancel{2}gH} \Rightarrow n = \frac{Vu_1 U_1}{gH}$$

$$\acute{O}\mu\omega\varsigma : W = gH - \frac{V_2^2}{2}$$

$$\acute{A}\rho\alpha : n = 1 - \frac{V_2^2}{2gH}$$

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Francis_turbine_for_Sakuma_power_station.jpg

Απόδοση στροβίλου Francis (2)

Εξήγηση του γιατί είναι απαραίτητος ο κώνος με α≈4° στον στρόβιλο Francis

Από την εξίσωση Bernoulli προκύπτει:

$$\left.\begin{aligned} &P_2+\rho g z+\frac{1}{2}\rho V_2^2=P_{atm}+\frac{1}{2}\rho V_0^2 \\ &\text{Εξίσωση συνέχειας}: V_2 S_2 = V_0 S_0 \Rightarrow V_0=\frac{V_2 S_2}{S_0} \end{aligned}\right\}\Rightarrow$$

$$P_2+\rho g z+\frac{1}{2}\rho V_2^2=P_{atm}+\frac{1}{2}\rho\frac{S_2^{\,2}}{S_0^{\,2}}V_2^2 \Rightarrow$$

$$P_2=P_{atm}-\rho g z-\frac{1}{2}\rho V_2^2+\frac{1}{2}\rho\frac{S_2^{\,2}}{S_0^{\,2}}V_2^2 \Rightarrow$$

$$P_2=P_{atm}-\rho g z-\frac{1}{2}\rho V_2^2\left(1-\frac{S_2^{\,2}}{S_0^{\,2}}\right)\ \text{δηλαδή η } P_2 \text{ μειώνεται}$$

$$\Delta P=\rho g H-P_2\ \left(\text{Αφού } P_2\downarrow\ \ \Delta P\uparrow\right)$$

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015. «Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού, Ενότητα: Βασικοί τύποι υδροστροβίλων» Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1954&id=4374

Σημείωμα Αδειοδότησης

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

**Όλοι οι διαδικτυακοί ιστότοποι που αναφέρονται ως πηγές εικόνων είναι ενεργοί στις 28/2/2015*